Journal of Agricultural Machinery
Vol. 8, No. 2, Fall - Winter 2018, p. 279-294

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۸، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۷، ص ۲۹۴-۲۷۹

طراحی و پیاده‌سازی دستگاه کشت هیدروپونیک دوار خورشیدی مجهز به سامانه هوشمند آبیاری

سید ایمان ساعدی[۱]- رضا علیمردانی[۲*]- حسین موسی‌زاده[۳]- رضا صالحی[٤]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۵/۱۸

چکیده

افزایش نیاز به غذا لزوم اصلاح الگوی کشت با هدف بیشترین تولید محصول، با کمترین مصرف نهاده‌ها و در هر شرایط اقلیمی را ضروری ساخته است. در این راستا، دستگاه کشت هیدروپونیک دوار خورشیدی مجهز به سامانه هوشمند آبیاری طراحی و ساخته شد. در این دستگاه که گیاهان در سینی‌هایی در محیط یک استوانه دوار، رو به محور مرکزی (محل نور مصنوعی) رشد می‌کنند تراکم کشت تا حد زیادی افزایش می‌یابد، بخشی از انرژی مورد نیاز ازطریق پنل‌های فتوولتائیک تأمین شده و آبیاری گیاهان (تماس سینی‌ها با آب مخزن زیرین) با تشخیص نیاز آبی براساس برآوردهای فازی تبخیر و تعرق با ورودی‌های دما، رطوبت هوا و نور صورت می‌گیرد. ارزیابی عملکرد سامانه با کشت کاهو در دو وضعیت آبیاری مبتنی بر تشخیص نیاز آبی (روش فازی) و بدون آن (روش On/Off) صورت گرفت. برطبق نتایج، در کشت فازی، گیاهان به‌طور متوسط روزانه ۲/۱۸ lit آب را به‌صورت تبخیر و تعرق از دست دادند. سامانه خورشیدی به‌طور متوسط ۵۱/۱۶٪ از نیاز سالانه را تأمین نمود و در دو کشت فازی و On/Off به‌ترتیب ۵۸/۸۱٪ و ۴۸/۴۱٪ انرژی مورد نیاز (در زمستان) از تابش خورشیدی حاصل گردید. تمامی شاخص‌های رشدی گیاه در کشت فازی به‌شکل معنی‌داری ($P<0/05$) از On/Off بهتر بود و برای تولید هر کیلوگرم محصول کاهو در کشت فازی نسبت به On/Off نیاز به ۴۳٪ مساحت کمتر، ۵۶٪ آب کمتر و ۷۴٪ انرژی کمتر بود. در این سامانه در مقایسه با روش مزرعه‌ای، تراکم کشت و میزان آب مورد نیاز برای پرورش هر بوته کاهو به‌طور متوسط به‌ترتیب ۱۲ برابر بیشتر و ۱۵ برابر کمتر بود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری هوشمند، انرژی خورشیدی، کشت دوار، منطق فازی، هیدروپونیک

مقدمه

نیاز روزافزون به محصولات کشاورزی همزمان با چالش‌هایی در زمینه کمبود آب، انرژی و خاک حاصلخیز کشاورزی، لزوم توجه به اصلاح الگوی کشت را بیش از پیش نمایان ساخته است. در این راستا، توجه به فن‌آوری‌های نوین در کشاورزی که امکان تولید حداکثر محصول با حداقل مصرف آب، انرژی و سایر نهاده‌ها و با حداقل وابستگی به شرایط آب و هوایی فصلی و اقلیمی را فراهم آورد، بسیار حائز اهمیت است. توجه به روش‌های کشت متراکم مثل کشت گلخانه‌ای و هیدروپونیک برای نیل به این اهداف امری ضروری به نظر می‌رسد. در این روش‌ها علاوه بر امکان افزایش چند برابری سطح زیر کشت، با به‌کارگیری شرایط کنترل شده می‌توان مصرف نهاده‌های کشاورزی را مدیریت نمود و به تولید فراوان، با کیفیت و مستمر (در تمامی فصول) محصولات کشاورزی دست یافت. در سال‌های اخیر توجه زیادی به روش‌های کشت متراکم در دنیا صورت گرفته است. در اوایل دهه ۱۹۸۰ تولید محصولات کشاورزی به روش هیدروپونیک به سرعت توسعه یافت. در سال ۱۹۹۱ تقریباً ۵۰۰۰ هکتار از ۶۲۶۰۰ هکتار گلخانه در اتحادیه اروپا زیر کشت هیدروپونیک بوده‌است (Roustaee, 2009). در کشور ایران سطح زیر کشت گلخانه‌ای در طی ده سال بیش از چهار برابر شده است و در سال ۱۳۹۳ بالغ بر یک میلیون و ششصد هزار تن محصول گلخانه‌ای تولید شده است (Anonymous, 2015)، اما در زمینه روش‌های هیدروپونیک پیشرفت چندانی مشاهده نشده است.

۱- استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود
۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
۳- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
۴- استادیار، گروه مهندسی علوم باغبانی و فضای سبز، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
(*- نویسنده مسئول: Email: rmardani@ut.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v8i2.61694

کشور ایران در یک اقلیم خشک و نیمه خشک واقع شده و در حال حاضر بیش از ۹۰ درصد آب استحصال شده از منابع آب کشور در بخش کشاورزی مصرف می‌شود. لذا اتخاذ روش‌هایی برای مدیریت منابع آب و افزایش بهره‌وری آن در کشاورزی امری ضروری است. بیش از ۹۹ درصد آب مصرفی گیاه صرف تبخیر و تعرق[1] (ET) می‌شود (Alizadeh, 2011). تبخیر و تعرق به معنی تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاه می‌باشد که بر حسب میلی‌متر بر واحد زمان سنجیده می‌شود. این پدیده، غیرخطی و پیچیده است و تحت تأثیر عوامل اقلیمی و گیاهی متعددی قرار دارد (Entesari, 2007)، لذا برآورد دقیق آن اگر نتوان گفت غیرممکن، کاری بس مشکل است (Alizadeh, 2011). بنابراین، عدم قطعیت زیادی در این راه وجود دارد و استفاده از هوش مصنوعی و به‌ویژه منطق فازی امکان برآورد آن با استفاده از مدل را میسر می‌سازد. تحقیقات زیادی بر روی استفاده از هوش مصنوعی در برآورد تبخیر و تعرق صورت گرفته است، مثل استفاده از سامانه‌های استنتاج فازی (Alavian, 2012; Moradi, 2012)، شبکه عصبی فازی (ANFIS) (Cobaner, 2011; Hashemi Najafi, 2007; Kişi and Öztürk, 2007; Shayannejad, 2007)، رگرسیون فازی (Shiri *et al.*, 2013) و نهایتاً روش‌های ژنتیک فازی ممدانی و سوگنو (Kişi, 2013). همچنین پژوهش‌هایی در زمینه پیاده‌سازی سامانه‌های آبیاری هوشمند با استفاده از منطق فازی صورت پذیرفته‌است. به‌عنوان مثال در پژوهشی از راهبرد منطق فازی برای طراحی یک سامانه آبیاری هوشمند در گلخانه استفاده شد که در آن میزان تبخیر و تعرق با استفاده از معادله پنمن مونتیث (Allen *et al.*, 1998) محاسبه شد و ورودی فازی تفاوت بین مقادیر واقعی و مطلوب رطوبت خاک و خروجی، کنترل دریچه آبیاری بود (Kia, 2009). در تحقیقی دیگر یک سامانه آبیاری فازی برای کشت فلفل در شرایط حفاظت شده پیاده گردید که در آن آب از دست رفته خاک با استفاده از حسگر رطوبت سنجیده می‌شد و سپس با استفاده از دما و رطوبت نسبی به‌عنوان ورودی‌های فازی، مدت آبیاری برای جبران آب از دست رفته تعیین می‌شد (Martha-Rocio *et al.*, 2015). سرانجام یک کنترلر فازی برای کاهش آبیاری یک سامانه قطره‌ای در گلخانه توسعه داده شد که دمای داخل گلخانه و رطوبت خاک را به‌عنوان ورودی‌های فازی و مدت زمان آبیاری را به‌عنوان خروجی کنترلر فازی لحاظ می‌کرد (Ed-Dahhak *et al.*, 2013).

در کنار چالش در زمینه منابع آب، چالش در زمینه منابع انرژی نیز امروزه توجه زیادی را به خود جلب کرده‌است و گرایش به سمت منابع جدید انرژی مثل انرژی پاک و تجدیدپذیر خورشیدی به امری اجتناب ناپذیر تبدیل شده‌است. در ایران میزان تابش خورشیدی بالاتر از متوسط جهانی و بین ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ $kWh\ m^{-2}\ year^{-1}$ تخمین زده شده‌است. در حوزه‌های مختلفی از کشاورزی می‌توان به تلاش محققین برای استفاده از این انرژی اشاره نمود. در پژوهشی، یک تراکتور با انرژی خورشیدی هیبریدی طراحی شد که قادر بود حدود ۱۸ درصد از انرژی مورد نیاز خود را توسط سلول‌های فتوولتاییک حاصل نماید (Mousazadeh *et al.*, 2010). همچنین یک سامانه خورشیدی هیبریدی هوشمند مبتنی بر منطق فازی برای گرمایش سالن مرغداری توسعه داده شد و نتایج امیدبخشی در کارایی آن به‌دست آمد (Mirzaee, 2013). در تحقیقی دیگر یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به سامانه گردش هوای بسته و محفظه جاذب رطوبت ساخته شد و عملکرد آن برای خشک کردن نعناع مورد بررسی قرار گرفت (Aghkhani *et al.*, 2013). در کنار آن، می توان به طراحی یک نمونه اولیه از ماژول‌های فتوولتاییک نیمه شفاف برای کاربرد در سقف گلخانه به‌منظور تأمین انرژی در گلخانه اشاره کرد (Yano *et al.*, 2014). سرانجام، می‌توان به پژوهشی اشاره نمود که در آن از انرژی خورشیدی برای توسعه سامانه کنترل خودکار کودآبیاری در یک سامانه آبیاری قطره‌ای در گلخانه، برای تولید نوعی خربزه استفاده شد. سه تایمر دیجیتال برای خاموش و روشن کردن افشانندها و پمپ‌های آبیاری استفاده شد تا عمل اختلاط کود و تنظیم بسامد روزانه آبیاری صورت گیرد. متوسط انرژی که پنل خورشیدی تولید می‌کرد حدود ۱۴۰ وات ساعت در روز بود، در حالی‌که سامانه در هر روز به طور متوسط ۱۰ وات ساعت انرژی نیاز داشت. این سامانه قادر بود تا ۷ روز بدون تابش خورشیدی کار کند (Salih *et al.*, 2012).

با توجه به مطالب بیان شده و لزوم توسعه روش‌های تولید مستمر محصولات کشاورزی و مدیریت استفاده از آب، انرژی و خاک حاصلخیز، هدف از این پژوهش طراحی و توسعه یک سامانه هوشمند کشت هیدروپونیک دوار است که کار کشت را در محیط بسته و در شرایط مختلف اقلیمی صورت می‌دهد، دارای قابلیت استفاده از فضا به جای سطح بوده و سطح زیر کشت را به‌صورت چشمگیری افزایش می‌دهد، تا حد امکان دارای بازده انرژی بالایی بوده و توانایی استفاده حداکثری از انرژی خورشیدی را دارد و در واحد کودآبیاری آن با پیش‌بینی نیاز آبی گیاه با بهره‌گیری از منطق فازی صرفه‌جویی فراوان در مصرف آب را امکان‌پذیر می‌کند.

مواد و روش‌ها

پدیده اربیتروپیسم[2] که در ایده اولیه ابداع دستگاه کشت دوار توسط مخترع آن بیان گردید بدین معنی است که چرخش گیاهان در

1- Evapotranspiration

2- Orbitropism

حال رشد باعث توزیع هورمون رشد در سرتاسر گیاه و در نتیجه رشد یکنواخت‌تر و سریع‌تر خواهد شد (Marchildon, 2003). سازمان فضایی امریکا (NASA) در تحقیقات خود در زمینه سامانه‌های کنترل شده اکولوژیکی پشتیبان حیات[1] (CELSS) در کنار برخی دیگر از روش‌های کشت هیدروپونیک به روش کشت در واحدهای دوار نیز به‌عنوان روشی برای تهیه سبزیجات مورد نیاز در فضا توجه داشته‌است. دستگاه کشت دوار خورشیدی مجهز به سامانه آبیاری (کودآبیاری) هوشمند[2] (SARCS) که در قالب این پژوهش طراحی و ساخته شده از سه واحد اصلی تشکیل شده‌است: واحد کشت هیدروپونیک دوار، واحد تأمین انرژی خورشیدی و واحد آبیاری هوشمند. در طراحی به‌گونه‌ای عمل شده‌است که سامانه تا حد ممکن، به لحاظ توان کم مصرف بوده و بخش زیادی از توان مورد نیاز خود را از منبع انرژی پاک خورشیدی دریافت کند. همچنین، سامانه آبیاری هوشمند عمل آبیاری گیاهان را به‌صورت هدفمند و با تخمین نیاز آبی گیاه، از طریق برآوردهای تبخیر و تعرق با استفاده از منطق فازی صورت می‌دهد. این مسئله کاهش مصرف آب و انرژی پمپاژ آب را به دنبال دارد. در شکل ۱ طرح شماتیک و کلی دستگاه و ارتباط اجزاء مختلف نمایش داده شده است. طرح سه بعدی این دستگاه ابتدا در محیط نرم‌افزار CATIA مدل و پس از تهیه نقشه‌ها در مقیاس واقعی ساخته شد.

واحد کشت هیدروپونیک دوار

استوانهٔ دوار کشت بخشی از این سامانه است که از جنس گالوانیزه گرم به قطر ۱۰۰ و طول ۸۰ cm ساخته شد. انتخاب این ابعاد با در نظر گرفتن توان لازم برای دوران، کیفیت دریافت نور توسط گیاهان، هزینه مواد و سایر ملاحظات صورت گرفت. با توجه به این ابعاد، سطح زیر کشت تأمین شده توسط این دستگاه حدود m^2 ۲/۵ می‌باشد که نسبت به حالت مسطح بیش از سه برابر خواهد بود. در طرح‌های توسعه‌ای، می‌توان چندین واحد کشت دوار را در کنار و یا روی هم قرار داد تا نسبت مذکور بیش از این افزایش یابد و در یک مساحت کم محصول بسیار زیادی تولید شود. در محیط استوانه و به موازات محور آن سینی‌های کشت با اتصال پیچ و مهره قرار گرفته‌اند که حاوی کیسه‌های کشت محتوی مخلوط پرلیت و کوکوپیت به‌عنوان بستر ریشه (Hassandokht, 2012a) برای قرارگیری گیاهان می‌باشند. سینی‌ها به تعداد ۲۰ عدد و به شکل ناودانی‌های مشبک، با مقطع مربع به ضلع ۷/۵ cm طراحی شدند که این ابعاد سازگار با بسترهای ریشه متداول موجود هستند. جهت‌گیری گیاهان به سمت محور استوانه است که در آنجا منبع نورمصنوعی (لامپ LED) قرار دارد. این استوانه از طریق محرک زنجیری و الکتروموتور به‌صورت پیوسته گردش می‌کند و گیاهان به‌ترتیب از مخزن زیرین (مخزن ثانویه) که با اتصال موقتی در زیر استوانه قرار گرفته است آب و مواد غذایی را دریافت می‌کنند (شکل ۲). این مخزن در مواقع لازم از طریق یک پمپ مستغرق در مخزن اولیه به میزان لازم پر می‌شود. روش خاص آبیاری این دستگاه نیاز به لوله‌کشی، قطره‌چکان و غیره که در روش‌های هیدروپونیک معمولی و کشت گلخانه‌ای متداول وجود دارد را مرتفع می‌سازد. شاسی اصلی با ستون‌هایی از پروفیل قوطی ساخته شده‌است که بر روی آن محل‌هایی برای قراردادن الکتروموتور، تکیه‌گاه‌ها و بخش انتقال توان، پایه برای قرارگیری لامپ و محلی برای قرارگیری مخزن ثانویه پیش‌بینی شده‌است. الکتروموتور از طریق چرخ و زنجیر توان دورانی را به چرخ محرک منتقل می‌کند و این چرخ به نوبهٔ خود با ارتباط با استوانهٔ دوار توان دورانی را به شکل اصطکاکی به آن منتقل می‌کند (شکل ۲).

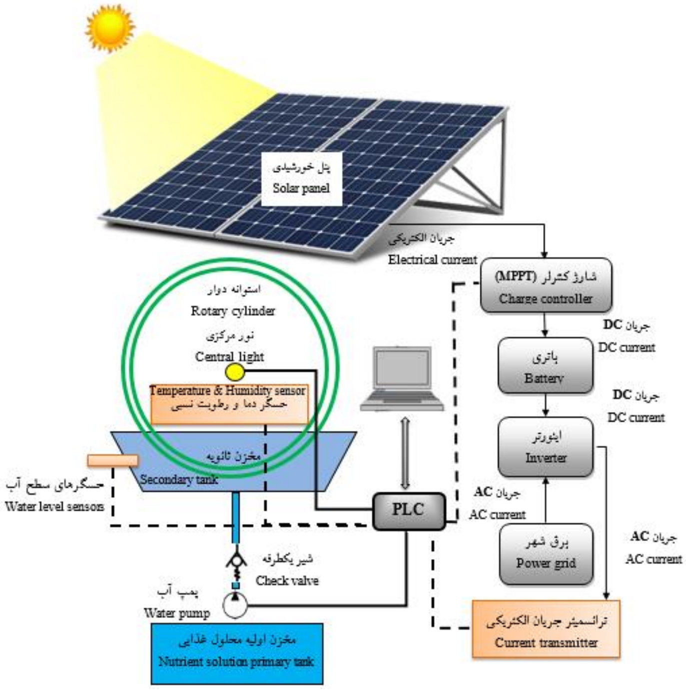
شکل قرارگیری منبع نوری در محور استوانه کشت اجازه دست‌یابی یکسان و مؤثر تمامی گیاهان به نور را می‌دهد و از پراکنش نور به فضای خارج از دسترس گیاهان جلوگیری می‌کند. لذا این روش نسبت به روش‌های کشت هیدروپونیک متداول به‌لحاظ تأمین نور دارای مزیت بوده و بازده بالاتری خواهد داشت. تدارک مدت نور و تاریکی مورد نیاز برای رشد (فتوپریود)، با تنظیم زمان خاموش و روشن شدن لامپ مرکزی به‌صورت خودکار انجام می‌شود. در این بخش لامپ‌های LED به جای لامپ‌های متداول پر مصرفی مثل متال هالید و سدیمی در نظر گرفته شدند تا با مصرف توان کم، نور مورد نیاز گیاه را تأمین کنند. پارامتر مهم در انتخاب لامپ‌های LED پاسخگویی آنها به طیف نوری مورد نیاز گیاهان است که از آن تحت عنوان تابش فعال فتوسنتزی[3] (PAR) یاد می‌شود (Hassandokht, 2012a). در تحقیقات مختلف لامپ‌های LED با رنگ‌ها، طول موج‌ها و درصد کاربرد متفاوت آزمایش شده‌اند (Chang and Chang, 2014; Morewane, 2014; Shimokawa *et al*., 2014; Wen *et al*., 2011; Yanagi *et al*., 1996). ساختار نوردهی مورد استفاده در این سامانه متشکل بود از یک رشته حدوداً ۱۷ متری از لامپ‌های LED نواری سفید که در اطراف یک لوله گالوانیزه به قطر ۱۰ cm پیچیده شد که در مجموع ۱۵۰ W توان نیاز داشت (شکل ۲).

واحد تأمین انرژی خورشیدی

برای تأمین انرژی مورد نیاز سامانه از دو پنل فتوولتائیک تک بلورین ۳۰۰ W ساخت شرکت Yingly Solar استفاده شد که به‌صورت سری به یکدیگر متصل و بر روی یک قاب سوار شدند و در

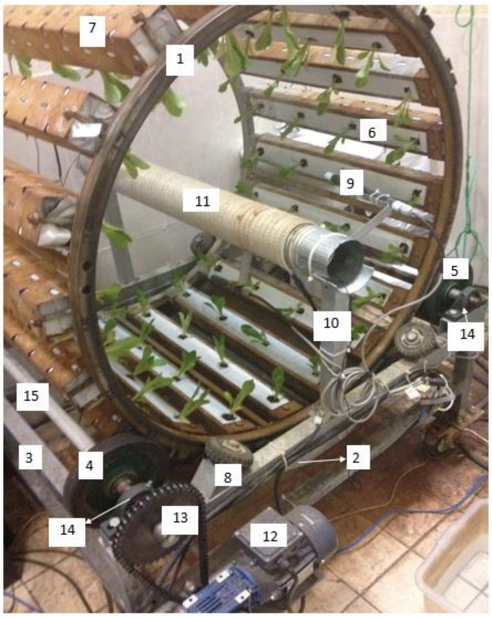
1- Controlled Ecological Life Support System
2- Solar Auto-irrigation Rotary Cropping System
3- Photosynthetically Active Radiation

مجموع W ۶۰۰ توان داشتند.



شکل ۱– طرح شماتیک از اجزای مختلف تشکیل‌دهنده سامانهٔ SARCS

Fig. 1. Schematic of SARCS components



شکل ۲– نمای کلی از دستگاه کشت دوار ساخته شده که نشاءهای کاهو در کیسه‌های کشت محتوی مخلوط پرلیت و کوکوپیت کاشته شده‌اند: ۱– استوانهٔ دوار کشت ۲– مخزن زیرین (مخزن ثانویه) ۳– شاسی ۴– چرخ محرک ۵– چرخ تکیه‌گاه ۶– کیسه کشت محتوی بستر ریشه ۷– سینی‌های کشت ۸– چرخ هرزگرد ۹– حسگر دما و رطوبت ۱۰– پایهٔ لامپ ۱۱– لامپ‌های LED ۱۲– الکتروموتور ۱۳– چرخ زنجیر ۱۴– یاتاقان ۱۵– میله انتقال توان

Fig. 2. SARCS major components: 1- Rotary cylinder 2- Secondary tank 3- Frame 4- Driving wheel 5- Support wheel 6- Grow bags containing substrate material 7- Trays 8- Freewheel 9- Temperature and humidity sensor 10- Lamp stand 11- LED lamps 12- Electromotor 13- Sprocket wheel 14- Bearing 15- Power transmitting shaft

به‌منظور ایجاد امکان تغییر زاویه جهت‌گیری پنل‌ها و تدارک بهترین بازده دریافت تابش خورشیدی در طول سال، مکانیزمی برای تغییر دستی این زاویه بر روی شاسی و در دو طرف آن تعبیه شد که ۶ زاویهٔ ۲۰ تا ۷۰ درجه با فواصل ده درجه را تأمین می‌کرد. انرژی خورشیدی استحصال شده از طریق کابل وارد شارژکنترلر از نوع جستجوکننده نقطه توان حداکثری[1] (MPPT)، (Western، WRM30) شده و از آنجا وارد باتری‌ها می‌گردید. دستگاه MPPT از یک مدار جستجو برای یافتن بیشترین توان پنل استفاده کرده و صرف نظر از ولتاژ بار و شرایط شارژ آن، به‌گونه‌ای عمل می‌کند که ماژول فتوولتائیک همواره در نقطهٔ توان حداکثری خود عمل کند، لذا انرژی به‌دست آمده از ماژول که در باتری ذخیره می‌شود حداکثر خواهد بود (Mousazadeh and Javanbakht, 2010).

از آنجایی که جریان تولیدی پنل‌ها جریان مستقیم است و مصرف‌کننده‌ها نیاز به جریان متناوب دارند از یک اینورتر (COTEK، ST1000-248) استفاده شد. این دستگاه همچنین وظیفه تغییر منبع توان از انرژی خورشیدی به برق شهر (و بالعکس) را داشت. برای ذخیرهٔ انرژی خورشیدی از چهار باتری 12 V- 100 Ah از نوع سرب اسیدی سیلد که به‌صورت سری به هم متصل شده‌اند استفاده شد. واحد تأمین انرژی سامانه هدف کاهش حداکثری استفاده از برق شهر و افزایش حداکثری استفاده از برق خورشیدی را دنبال می‌کرد. لذا استفاده از منبع خورشیدی به‌عنوان اولویت اول سامانه تأمین توان در نظر گرفته شد. در شرایطی که انرژی خورشیدی در دسترس نباشد یا ذخیره آن در باتری‌ها امکان تأمین انرژی سامانه را نداشته باشد، از برق شهر به‌عنوان اولویت دوم استفاده می‌شد. از این رو، این واحد از نوع سامانه‌های متصل به شبکه[2] بود. برای اندازه‌گیری انرژی مصرف شده توسط بخش‌های مختلف سامانه از یک ترانسمیتر برق AC تک فاز مدل TM-1510-M استفاده شد.

واحد آبیاری هوشمند

سخت‌افزارهای مورد استفاده در این بخش شامل حسگر سطح آب مخزن ثانویه و حسگرهای یکپارچه دما و رطوبت نسبی محیط بود که با ارسال سیگنال‌هایی به PLC زمینه را برای ارسال دستورات لازم به عملگر پمپ آب فراهم می‌آورد. دو نظام آبیاری برای سامانه SARCS لحاظ شد. یکی بر اساس تشخیص زمان خالی شدن مخزن ثانویه (آبیاری غیرفازی یا On/Off) از طریق حسگرهای سطح آب در آن مخزن و دیگری مبتنی بر تشخیص نیاز آبی گیاه (آبیاری فازی) که با برآورد تبخیر و تعرق گیاهان از طریق منطق فازی با

1- Maximum Power Point Tracker

2- on-grid

ورودی‌های دما، رطوبت نسبی و نور فرمان آبیاری را صادر می‌کرد. حسگرهای دما و رطوبت نسبی مورد استفاده به شکل لوله و از مدل SHT11 قادر به اندازه‌گیری رطوبت صفر تا ۱۰۰٪ و دمای ۴۰- تا ۱۲۳/۸ درجه سلسیوس بودند. سه عدد از این حسگرها در داخل فضای استوانهٔ دوار و در فاصله تقریبی ۳۵ cm از سطح کشت قرار داده شدند. حسگر سطح آب مخزن ثانویه که در واقع از سه الکترود تشکیل شده بود سه موقعیت مخزن شامل موقعیت سطح بالا، موقعیت سطح پایین و موقعیت سطح مبنا را در اختیار می‌گذاشت. به هنگام پمپاژ آب به مخزن ثانویه، هنگامی که سطح آب به الکترود موقعیت سطح بالا برسد عمل پمپاژ قطع می‌گردد. همچنین هنگام خالی شدن مخزن وقتی که سطح آب به پایین‌تر از الکترود پایین برسد، فرمان پمپاژ برای پر شدن مجدد مخزن صادر می‌شود. افت سطح آب بین الکترود بالا و پایین باعث صدور فرمان پمپاژ نمی‌گردد.

تئوری تحقیق

طراحی سامانه خورشیدی

اولین مرحله طراحی اندازه سامانه‌های فتوولتائیک، تخمین انرژی مورد نیاز است. برای این منظور بایستی حاصلضرب ساعات کارکرد در توان مصرفی بخش‌های مختلف دستگاه در هر شبانه روز محاسبه شود. در مورد سامانه SARCS منابع مصرف توان شامل الکتروموتور، لامپ، پمپ آب و تجهیزات تابلوبرق (شامل قطعات الکترونیکی و کنترلی) بود. با توجه به بررسی عملکرد دستگاه، کل انرژی مصرفی سامانه در هر شبانه روز برابر با ۴۶۰۰ Wh بود. بنابراین، در مجموع ۱۶۷۹ kWh انرژی در سال مورد نیاز بود. مرحله بعدی طراحی تعیین میزان تابش موجود در محل طراحی سامانه (شهرستان کرج) است. بدین منظور از مفهوم ساعات اوج خورشیدی[3] (R_{yr}) استفاده شد. برای استفاده از این مفهوم، تابش بیان شده بر حسب kWh m^{-2} day^{-1} به لحاظ عددی، معادل با "تعداد ساعات اوج روزانه" در یک kW m^{-2} (یک خورشید[4]) لحاظ گردید (Masterss, 2004). برای تعیین این پارامتر، با استفاده از داده‌های هواشناسی سال ۲۰۱۶ شهرستان کرج اطلاعات تابش روزانه، استخراج و میانگین آنها محاسبه شد که برابر با ۵/۲۳ kWh m^{-2} day^{-1} به‌دست آمد. بنابراین، در شرایط استاندارد (یک خورشید) میزان تابش معادل با ۵/۲۳ h day^{-1} بوده است. از این رو، توان AC تحویلی توسط یک آرایه تحت تابش استاندارد خورشیدی (P_{AC}) به شکل رابطه (۱) به‌دست می‌آید.

3- Peak Sun Hours

4- Sun

$$Energy\ (kWh\ yr^{-1}) = P_{AC}\ (kW) \times R_{yr}\ (h/day) \times 365\ (days\ yr^{-1}) \Rightarrow P_{AC} = \frac{1679}{5.23 \times 365} = 0.88\ kW \quad (1)$$

برای در نظر گرفتن اثر دما، بازده اینورتر، ناسازگاری ماژول و آلودگی روی آن بر تبدیل توان DC به AC، بازده تبدیل به میزان ۰/۷۵ لحاظ شد (Masterss, 2004). بدین ترتیب توان DC نامی آرایه تحت شرایط استاندارد (P_{DC}) به شکل رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

$$P_{DC} = \frac{0.88}{0.75} = 1.17\ kW \quad (2)$$

در مرحله بعد، با منظور نمودن ماژول‌های نوع سیلیکون بلورین، بازده ۱۲/۵ ٪ $= \mu_p$ برای آنها در نظر گرفته شد (Masterss, 2004). بنابراین، سطح مقطع مورد نیاز پنل در شرایط استاندارد به شکل رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$P_{DC} = 1\frac{kWh}{m^2} \times A\ (m^2) \times \mu_p \quad (3)$$

$$\Rightarrow A = \frac{1.17}{0.125} = 9.36\ \text{m}^2$$

از آنجا که هر پنل انتخابی ۳۰۰ W توان نامی دارد و نیاز به ۱۱۷۰ W توان DC در شرایط استاندارد وجود دارد، بنابراین به ۳/۹ یا به عبارت دیگر چهار پنل از نوع انتخاب شده نیاز است. در این پژوهش از دو پنل با توان مجموع ۶۰۰ W استفاده شد. این عدد، توان نامی DC تولید شده پنل‌ها تحت شرایط استاندارد است. پنل انتخاب شده دارای سطح مقطع m^2 ۱/۹۸×۰/۹۹ بود. از این رو، استفاده از چهار پنل نیازمند سطحی معادل m^2 ۷/۸۴ بود که کمی کمتر از برآورد صورت گرفته بر طبق رابطه (۳) است. با توجه به تأمین دو پنل، در مجموع به میزان m^2 ۳/۹۲ مساحت مورد نیاز بود که این عدد در طراحی و ساخت شاسی نگه دارنده پنل‌ها لحاظ شد.

با فرض بازده تبدیل ۷۵٪ و در اختیار داشتن ۵/۲۳ $\text{kWh m}^{-2}.\text{day}^{-1}$ تابش روزانه متوسط در سال، مقدار انرژی که واحد تأمین توان خورشیدی این سامانه تأمین می‌کند در شرایط استفاده از چهار پنل با توان ۰/۳ kW به‌صورت رابطه (۴) خواهد بود:

$$\text{Energy} = 4 \times 0.3 \times 0.75 \times 5.23 \times 365 = 1718.05\ \text{kWh yr}^{-1} \quad (4)$$

که این میزان انرژی تولیدی با توجه به ۱۶۷۹ kWh انرژی مورد نیاز سامانه SARCS در سال، قادر به برآوردن کل نیاز آن است. اما به دلیل استفاده از دو پنل به‌جای چهار پنل، میزان انرژی تأمین شده توسط واحد تأمین توان خورشیدی معادل ۸۵۹/۰۳ kWh در سال می‌باشد. به عبارت دیگر، واحد تأمین توان خورشیدی مورد استفاده در سامانه SARCS قادر به تأمین ۵۱/۱۶٪ از کل نیاز سالانه سامانه می‌باشد.

مدل فازی آبیاری هوشمند

در روش آبیاری فازی با تشخیص زمان آبیاری (نیاز آبی گیاهان)، میزان آب مورد نیاز برای پر کردن مخزن تا جایی که ارتفاع آب به محلی مناسب برای دسترسی سینی‌های کشت برسد پمپاژ می‌شود. از آنجا که ارتفاع آب پیش از هر عمل آبیاری متفاوت است پس عمل آبیاری فازی دارای بسامد متغیر و نیز مدت زمان متغیر می‌باشد. معیار اصلی برای تشخیص نیاز آبی، برآورد تبخیر و تعرق است. مقادیر تبخیر و تعرق در هر پنج ثانیه توسط مدل فازی برآورد شده و با مقادیر قبلی جمع می‌شود تا تبخیر و تعرق تجمعی محاسبه شود. در این شرایط، چون بستر ترکیبی در داخل کیسه‌های کشت قرار داشتند، عملاً فرآیند تبخیر و تعرق منحصر به تعرق اندام‌های گیاهی بود. از آنجا که هر میزان تبخیر و تعرق باعث کاهش رطوبت بستر ریشه می‌شود، پس تبخیر و تعرق تجمعی تا حدی محاسبه می‌گردد که رطوبت بستر ریشه تا حد مقدار آب سهل‌الوصول[1] (Alizadeh, 2011) که به اختصار RAW نامیده می‌شود، کاهش یابد. در این زمان دستور پمپاژ آب برای پر کردن مخزن ثانویه و تسهیل تماس سینی‌های کشت با آب صادر می‌شود. با توجه به انتخاب بستر ترکیبی پرلیت و کوکوپیت (با نسبت اختلاط مساوی) به‌عنوان بستر ریشه، ظرفیت زراعی برابر با ۶۰/۸۹٪ لحاظ گردید (Mazari-Menghabi, 2014). مقدار آب سهل‌الوصول که یکی از نقاط پتانسیلی خاک است بر طبق رابطه (۵) با ظرفیت زراعی در ارتباط می‌باشد (Alizadeh, 2011):

$$\text{RAW} = (2.3 + 0.37\ \text{FC}) \times \text{MAD} \quad (5)$$

به‌طوری که FC ظرفیت زراعی[2] و MAD حداکثر تخلیه مجاز[3] است که برای کاشت گیاه کاهو برابر با ۰/۳ منظور می‌شود (Alizadeh, 2011)، یعنی حداکثر پس از آن‌که ۳۰٪ آب ذخیره شده بین ظرفیت زراعی و حد آب قابل جذب گیاه به سبب تبخیر و تعرق خارج شد، برای اینکه گیاه کاهو از کم آبی صدمه نبیند باید آبیاری صورت گیرد. بنابراین، مقدار آب سهل‌الوصول با استفاده از رابطه (۵) معادل ۷/۴۵٪ به‌دست می‌آید. با توجه به ابعاد مقطع سینی‌های کشت، حداکثر عمق توسعه ریشه ۶/۸ cm لحاظ شد که ۷/۴۵٪ آن معادل با ۵ mm است. لذا، خروج ۵ mm آب به معنی از دست رفتن مقدار آب سهل‌الوصول و لزوم انجام آبیاری است. هریک از سینی‌ها ابعادی معادل با cm^2 ۶/۵ ×۶۵ را برای کشت در اختیار می‌گذاشتند. لذا در مجموع تبخیر و تعرق در سطحی معادل با m^2 ۰/۸۴ رخ می‌داد. بنابراین خروج ۵ mm آب از این سطح معادل با ۴/۲۲ lit می‌باشد. خروج این مقدار آب از گیاه به سبب تبخیر و تعرق به معنی از دست

1- Readily Available Water
2- Field Capacity
3- Maximum Allowable Depletion

رفتن آب سهل‌الوصول است. لذا، با در نظر گرفتن برخی خطاهای احتمالی در اندازه‌گیری‌ها و محاسبات، به سبب اطمینان از عملکرد بهینه سامانه آبیاری فازی، به جای ۴/۲۲ lit مقدار ۴ lit لیتر به‌عنوان حد نهایی تبخیر و تعرق برای صدور دستور آبیاری انتخاب شد.

در دستگاه کشت دوار موضوع این پژوهش صرفاً نور مصنوعی وجود دارد و جریان هوا نیز قابل چشم‌پوشی است. لذا، به‌منظور برآورد فازی تبخیر و تعرق، این سامانه دارای ورودی‌های دما، رطوبت نسبی محیط کشت و نور مصنوعی و یک خروجی یعنی تبخیر و تعرق است. از بین ورودی‌ها، پارامتر نور که تنها متأثر از منبع نور مصنوعی است، بسته به تنظیمات فتوپریود دارای دو حالت روشن و خاموش است که به‌ترتیب مقادیر یک و صفر به آن نسبت داده می‌شود. مقادیر دو ورودی دیگر یعنی دما و رطوبت نسبی حاصل میانگین اعداد خوانده شده توسط سه حسگر یکپارچه دما و رطوبت نسبی داخل استوانه کشت می‌باشد. با توجه به دقت مناسب و عمومیت توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای، از این نوع توابع برای پارامترهای ورودی و خروجی مدل فازی استفاده شد (Teshneh Lab *et al.*, 2013). بازه‌ها و توابع عضویت در شکل ۳ معرفی شده‌اند. مقادیر بازه‌های خروجی (تبخیر و تعرق) با توجه به فواصل زمانی داده‌گیری تعیین شد که در اینجا پنج ثانیه در نظر است. یعنی خروجی مدل، تبخیر و تعرق پنج ثانیه‌ای بود. در جدول ۱ نمادهای مورد استفاده در این بخش و در جدول ۲ ویژگی‌های اصلی مدل فازی برآورد تبخیر و تعرق معرفی شده‌اند. برای توسعه مدل فازی از محیط برنامه نویسی نرم‌افزار MATLAB R2015a استفاده شد.

جدول ۱- نمادهای مورد استفاده در سامانه فازی

Table 1- Fuzzy model nomenclature

VH	H	M	L	VL	ON	OFF	ET	Rh	T
خیلی بالا	بالا	متوسط	پایین	خیلی پایین	لامپ روشن	لامپ خاموش	تبخیر و تعرق	رطوبت نسبی	دما
Very high	High	Medium	Low	Very low	Light ON	Light OFF	ET	Humidity	temperature

جدول۲- برخی ویژگی‌های اصلی مدل فازی برآورد تبخیر و تعرق

Table 2- Some properties of the developed fuzzy model for the prediction of ET

Model type	And Method	Or Method	Imp Method	Agg Method	Defuzz Method
mamdani	min	max	min	max	centroid

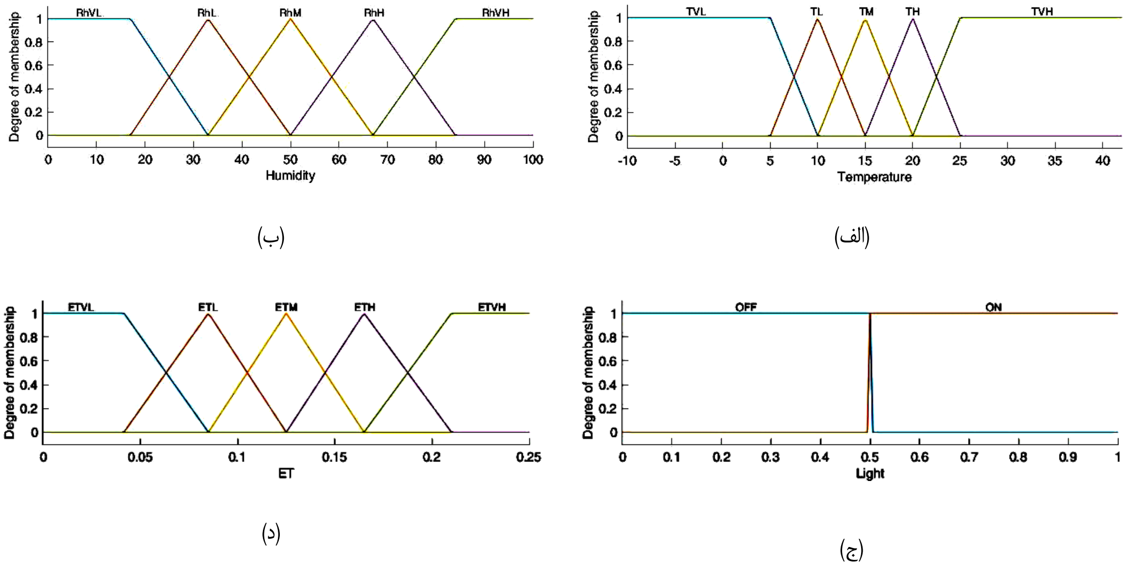
با توجه به انتخاب ۵، ۵ و ۲ تابع عضویت به‌ترتیب برای ورودی‌های دما، رطوبت نسبی و نور می‌توان حداکثر ۵۰ قاعده فازی در نظر گرفت که با توجه به ارزیابی پارامترها، نظر خبره و یافته‌های تجربی، این قواعد به‌صورت جدول ۳ ترتیب داده شدند.

سطح کنترلی مدل فازی پیش‌بینی میزان تبخیر و تعرق متناسب با تغییرات دما و رطوبت نسبی در شکل ۴ نشان داده شده‌است. مطابق با این شکل مشاهده می‌شود که بیشترین مقادیر تبخیر و تعرق در رطوبت‌های پایین و دماهای بالا اتفاق می‌افتد که روشن بودن لامپ‌ها نیز بر این روند افزایشی اثر مستقیم می‌گذارد.

جدول ۳- قواعد فازی مدل برآورد تبخیر و تعرق

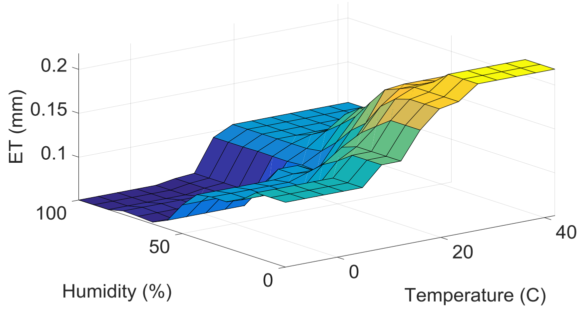
Table 3- Fuzzy rules of the developed model for the prediction of ET

	Light ON					**Light OFF**				
	RhVL	**RhL**	**RhM**	**RhH**	**RhVH**	**RhVL**	**RhL**	**RhM**	**RhH**	**RhVH**
TVL	ETM	ETM	ETL	ETL	ETL	ETM	ETL	ETL	ETVL	ETVL
TL	ETH	ETM	ETM	ETL	ETL	ETM	ETM	ETL	ETVL	ETVL
TM	ETH	ETM	ETL	ETL	ETL	ETH	ETM	ETL	ETL	ETL
TH	ETVH	ETH	ETM	ETM	ETM	ETH	ETH	ETM	ETL	ETL
TVH	ETVH	ETVH	ETH	ETM	ETM	ETVH	ETH	ETM	ETM	ETL



شکل ۳– توابع عضویت مربوط به پارامترهای ورودی الف) دما، ب) رطوبت نسبی، ج) نور و د) پارامتر خروجی تبخیر و تعرق

Fig. 3. Membership functions of the fuzzy model inputs (temperature, humidity, and light) and output (ET)



(ج)

شکل ٤– سطح کنترلی مدل فازی پیش‌بینی تبخیر و تعرق متناسب با تغییرات دما و رطوبت نسبی

Fig. 4. The output of fuzzy model controlling surface of the prediction of ET

ارزیابی عملکرد سامانه

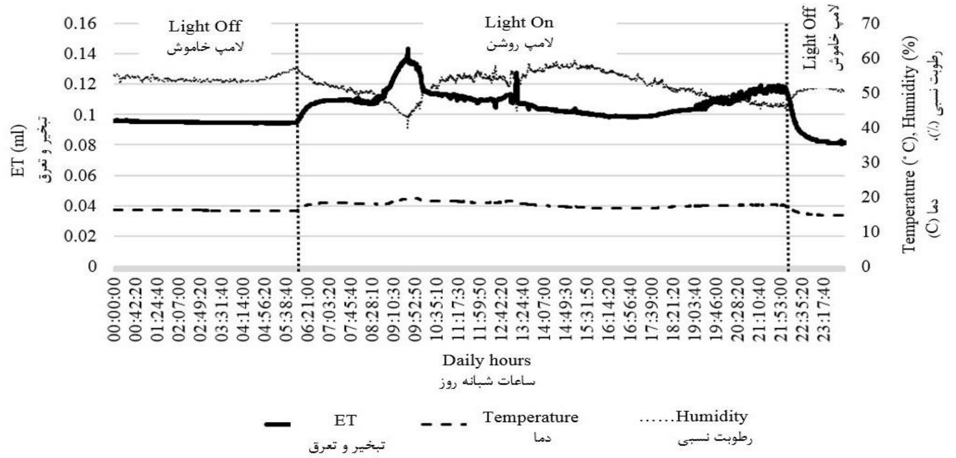
برای ارزیابی عملکرد سامانه، نشاءهای گیاه کاهوی گلخانه‌ای رقم رومن[1] که سه تا پنج برگ داشتند در دو وضعیت آبیاری فازی و On/Off در زمستان سال ۱۳۹۵ در دستگاه کاشته شدند. نشاءها با ایجاد شکاف‌هایی در کیسه‌های کشت در فواصل ۱۵ سانتی‌متری (چهار نشاء در هر سینی کشت) در بستر قرار داده شدند. بنابراین، در مجموع ۸۰ گیاه در دستگاه کاشته شد. همچنین شکاف‌هایی در زیر کیسه‌های کشت برای ایجاد شرایط آب‌گیری و نیز زهکشی بستر ایجاد گردید. از محلول غذایی هوگلند[2] برای تغذیه گیاه استفاده شد و فتوپریود ۸/۱۶ منظور گردید، یعنی لامپ ۱۶ ساعت (از ساعت ۰۶:۰۰ تا ۲۲:۰۰) روشن و ۸ ساعت خاموش نگه داشته شد. لازم به ذکر است که در این سامانه، هیچ‌گونه کنترلی بر روی شرایط محیطی کشت صورت نگرفت. برداشت محصول در هر دو کشت On/Off و فازی پس از ۳۳ روز انجام شد و ارزیابی‌های مدل فازی برآورد تبخیر و تعرق، مصرف آب، مصرف انرژی و عملکرد زراعی بر مبنای داده‌های جمع‌آوری شده و اندازه‌گیری‌های مختلف صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

در شکل ۵ تغییرات مقادیر تبخیر و تعرق پنج ثانیه‌ای برآورد شده در برابر ورودی‌های دما، رطوبت نسبی و نور به‌طور نمونه در یک روز کشت در ساعات مختلف (از ساعت ۰۰:۰۰ تا ۲۴:۰۰) نشان داده شده

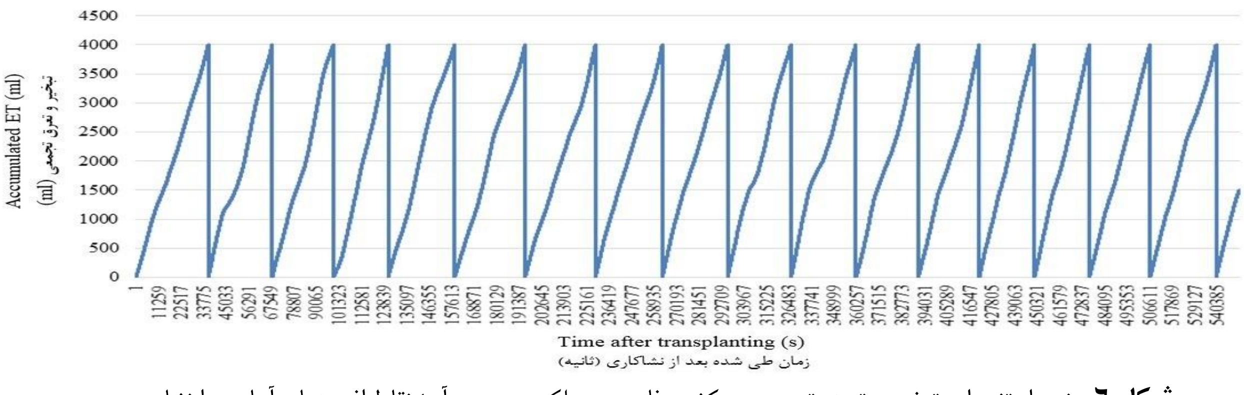
1- Romaine lettuce
2- Hoagland

است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در ساعت ۰۶:۰۰ یک جهش در نمودار تغییرات تبخیر و تعرق دیده می‌شود. این امر به دلیل روشن شدن لامپ در این ساعت است که تأثیر مستقیم بر مقادیر تبخیر و تعرق برآورد شده می‌گذارد. به دلیل همین تأثیر، در ساعت ۲۲:۰۰ همزمان با خاموش شدن لامپ، نمودار تبخیر و تعرق افت پیدا می‌کند. در تمام مدت، هر زمان که دما بالاتر و رطوبت نسبی پایین‌تر است، تبخیر و تعرق برآورد شده مقادیر بالاتری دارد و بالعکس، وقتی که دما در مقادیر پایین‌تر و رطوبت نسبی در مقادیر بالاتر باشد، تبخیر و تعرق برآورد شده مقادیر کمتری را تجربه می‌کند که این نکته با جنبه‌های تئوری تبخیر و تعرق سازگار است. برآورد تبخیر و تعرق گیاه در سرتاسر دوره کشت فازی نشان داد که گیاهان در مجموع حدود ۶۹/۵ lit آب را به‌صورت تبخیر و تعرق از دست داده‌اند که به‌طور متوسط در هر روز ۲/۱۸ lit بوده است.



شکل ۵- تغییرات مقادیر تبخیر و تعرق برآورد شده پنج ثانیه‌ای در کنار تغییرات ورودی‌های آن در یک روز کشت فازی به‌عنوان نمونه
Fig. 5. Variation of the estimated five-second ETs and its inputs in a sample day

در شکل ۶ نمودار تغییرات تبخیر و تعرق تجمعی در طول دوره کشت فازی که بیانی از عملکرد پمپ در این کشت می‌باشد نشان داده شده‌است. این نمودار یک روند صعودی دارد، اما هنگامی که به مقدار ۴۰۰۰ ml می‌رسد دوباره صفر می‌شود. در این هنگام پمپ آب فعال شده و عمل آبیاری صورت می‌گیرد. پس از صفر شدن نمودار، روند صعودی تا رسیدن به مقدار فوق تکرار می‌شود. مشاهده می‌شود که شیب افزایش تبخیروتعرق تجمعی و نیز بازه‌های زمانی صفر شدن آن یکسان نیستند. این مسئله به معنی متغیر بودن بسامد کود آبیاری است.



شکل ٦- نمودار تغییرات تبخیر و تعرق تجمعی در کشت فازی و عملکرد پمپ در آن؛ نقاط افت زمان آبیاری را نشان می‌دهند.
Fig. 6. Variations of the accumulated five-second ETs implying pump performance when drops to zero.

در جدول ۴ برخی پارامترهای عملکردی در دو کشت فازی و On/Off به‌طور خلاصه بیان شده‌است. در هر یک از دو کشت ۸۰ کاهو پرورش داده شد. با توجه به اینکه مساحت اشغال شده دستگاه همراه با شاسی حدوداً ۱/۲ متر مربع است، لذا حداکثر تراکم کشت در

این سامانه ۶۶ گیاه در هر متر مربع بود. کاهو در مزرعه در فواصل ۲۵ تا ۴۰ سانتی‌متری و فاصله ردیف ۴۰ تا ۷۵ سانتی‌متری کشت می‌شود (Hassandokht, 2012b)، یعنی تراکم کشت کاهو در مزرعه در هر متر مربع ۳/۵ تا ۱۰ بوته است. این پارامتر در گلخانه، ۱۱ تا ۲۵ بوته در هر متر مربع می‌باشد (Hassandokht, 2012a). یعنی تراکم کشت این دستگاه نسبت به مزرعه به‌طور متوسط بیش از ۱۲ برابر و نسبت به گلخانه بیش از ۴ برابر است. همچنین، طبق جدول ۴، در کشت فازی نسبت به On/Off مجموع محصول تولیدی کاهو به میزان ۷۴/۴۷٪ رشد داشته است. با توجه به سطح مقطع اشغال شده، در کشت فازی و On/Off به‌طور متوسط به‌ترتیب ۳/۴۲ و ۱/۹۶ کیلوگرم در هر مترمربع، محصول تولید شده‌است. با توجه به اینکه عملکرد کاهو در مزرعه ۳/۲ کیلوگرم در هر متر مربع است (Hassandokht, 2012b)، کشت فازی در سامانه دوار باعث بهبود این شاخص شده است. طبق جدول ۴، در طول دوره رشد کاهو در کشت On/Off و فازی به‌ترتیب در مجموع ۲۳۲/۴۷ و ۱۷۶/۷۶ lit آب مصرف شد. یعنی میزان مصرف آب برای پرورش هر بوته کاهو از ۲/۹۱ lit در کشت On/Off با ۲۴٪ کاهش به ۲/۲۱ lit در کشت فازی رسید. این در حالی است که برای پرورش هر بوته کاهو در مزرعه نیاز به ۱۴ تا ۴۸ lit آب وجود دارد (Peivast, 2009; Hassandokht, 2012b) که این رقم در سامانه دوار این پژوهش به‌طور متوسط ۱۵ برابر کمتر شد. در زمینه مصرف انرژی، میزان کل انرژی مصرفی در هر دو کشت فازی و On/Off برابر و حدود ۱۴۷ kWh بود که این مسئله با توجه به یکسان بودن دوره رشد در دو کشت و نیز فتوپریود یکسان قابل پیش‌بینی بود. اما به سبب تولید محصول بیشتر در کشت فازی نسبت به On/Off میزان انرژی لازم برای تولید هر کیلوگرم محصول قابل مصرف کاهش نشان داد.

جدول ٤– پارامترهای عملکرد در دو کشت فازی و On/Off

Table 4- Perfoemance parameters in fuzzy and On/Off treatments

پارامتر مرتبط با عملکرد **Performance and yield related parameters**	نوع کشت **کشت On/Off**	 **کشت فازی**
کل اندام هوایی تازه (بخش قابل مصرف) (kg) Total fresh shoot weight (kg)	2.35	4.104
کل اندام هوایی خشک (بخش قابل مصرف) (kg) Total dry shoot weight (kg)	0.0998	0.156
کل زیست‌توده تازه تولید شده (kg) Total fresh biomass weight (kg)	2.81	4.805
کل زیست‌توده خشک تولید شده (kg) Total dry biomass weight (kg)	0.135	0.207
میزان سطح اشغال شده (m^2) Area occupied (m^2)	1.2	1.2
میزان مصرف آب (lit) Water consumption (lit)	232.47	176.76
متوسط دور (بسامد) کود آبیاری (hr) Mean fertigation frequency (hr)	22	41.5
تعداد دفعات آبیاری Number of irrigation events	34	18
میزان مصرف انرژی کل (kWh) Total energy consumption (kWh)	147.33	147.61
میزان مصرف انرژی خورشیدی (kWh) و درصد آن Solar energy consumption (kWh) and its contribution (%)	71.32 (48.41%)	86.81 (58.81%)
میزان مصرف برق شهر (kWh) و درصد آن Power grid energy consumption (kWh) and its contribution (%)	76.00 (51.59%)	60.80 (41.19%)
میزان تولید محصول در واحد سطح ($kg\ m^{-2}$) Yield per area unit (kg/m^2)	1.96	3.42
تعداد گیاه در واحد سطح ($plant\ m^{-2}$) Plant density ($plant\ m^{-2}$)	66.67	66.67
میزان تولید زیست توده خشک کل در واحد سطح ($kg\ m^{-2}$) Total dry biomass per area unit ($kg\ m^{-2}$)	0.112	0.172

جدول ۵- تجزیه واریانس شاخص‌های رشدی کاهو در دو کشت فازی و On/Off

Table 5- Analysis of variance of lettuce growth parameters in fuzzy and On/Off treatments

شاخص‌های رشدی Growth parameters	منابع تغییرات Source of variations	درجه آزادی Degree of freedom	مجموع مربعات Sum of squares	میانگین مربعات Mean of squares	F	P
تعداد برگ‌ها Number of leaves	تیمار Treatment	1	512.20	512.20	75.20	<.0001*
	خطا Error	158	1076.13	6.81		
	کل Total	159	1588.33			
وزن تازه کل (g) Total fresh weight (g)	تیمار Treatment	1	24796.39	24796.4	81.81	<.0001*
	خطا Error	158	47888.758	303.1		
	کل Total	159	72685.152			
وزن خشک کل (g) Total dry weight (g)	تیمار Treatment	1	31.67	31.67	73.17	<.0001*
	خطا Error	158	68.40	0.43		
	کل Total	159	100.08			
مجموع سطح برگ هر بوته (m^2) Plant sum of leaf area (m^2)	تیمار Treatment	1	0.1013	0.1013	87.47	<.0001*
	خطا Error	158	0.183	0.00116		
	کل Total	159	0.284			

* معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪

همچنین، تأمین ۵۸/۸۱٪ و ۴۸/۴۱٪ انرژی در دو کشت فازی و On/Off از منبع خورشیدی نشان از کارایی بالای این سامانه در استفاده از انرژی خورشیدی دارد. این مسئله تلویحاً بیان می‌کند که در روزهای پر تابش سال، سامانه خورشیدی قادر است درصد بسیار زیادی از نیازهای انرژی را تأمین نماید. طبق جدول ۴، میزان زیست‌توده خشک کل در کشت فازی و On/Off به‌ترتیب ۰/۱۷۲ kg m^{-2} و ۰/۱۱۲ بود. در پژوهشی مشابه که کشت کاهو به روش هیدروپونیک در محفظه رشد کنترل شده و تحت نور LED سفید صورت گرفت (Poulet *et al.*, 2014) در هر متر مربع ۰/۰۳۷ کیلوگرم زیست‌توده خشک تولید شد که حدود یک سوم کشت On/Off و حدود یک پنجم کشت فازی این پژوهش بود. علاوه بر این، با توجه به نتایج جدول ۴، برای تولید هر کیلوگرم زیست‌توده خشک در کشت On/Off به میزان ۱۰۹۱ kWh انرژی مصرف شد که این رقم در کشت فازی به ۷۱۳ kWh رسید. این شاخص در پژوهش پولت و همکاران ۷۹۰ kWh بود (Poulet *et al.*, 2014). یعنی کشت فازی باعث بهبود این رقم گردید. در نهایت، مقایسه میزان نهاده مصرف شده برای تولید هر کیلوگرم محصول قابل مصرف در دو کشت فازی و On/Off با در نظر گرفتن نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که تولید هر کیلوگرم محصول کاهو در کشت فازی نسبت به On/Off نیاز به ۴۳٪ مساحت کمتر، ۵۶٪ آب کمتر و ۷۴٪ انرژی کمتر دارد.

در جدول ۵ تجزیه واریانس برخی شاخص‌های رشدی کاهو در دو کشت فازی و On/Off ارائه شده‌است. در تمامی شاخص‌ها مقدار P از ۰/۰۵ کوچکتر بود که این نشان می‌دهد اثر تیمار در سطح ۵٪ معنی‌دار است. به بیان دیگر بین شاخص اندازه‌گیری شده گیاه در کشت فازی و On/Off اختلاف معنی‌دار وجود دارد.

در مجموع، مقایسه کشت فازی با On/Off با توجه به نتایج جدول‌های ۴ و ۵ این نکته را به اثبات رساند که آبیاری هدفمند با توجه به برآورد نیاز آبی گیاه در کنار صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش کارایی استفاده از نهاده‌ها موجب بهبود شاخص‌های عملکردی و رشدی گیاه نیز می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک سامانه کشت هیدروپونیک دوار طراحی و ساخته شد که کار کشت را در محیط بسته و با حداکثر استفاده از فضا صورت می‌دهد، مجهز به سامانه آبیاری هوشمند برای انجام آبیاری بر اساس تشخیص نیاز آبی گیاهان است، و بخشی از انرژی مورد نیاز خود را از طریق پنل‌های فتوولتائیک از نور خورشید دریافت می‌کند. نتایج طراحی واحد تأمین توان خورشیدی نشان داد که این بخش قادر است ۵۱/۱۶٪ از نیاز کل سامانه را در طول سال در اقلیم شهرستان کرج تأمین نماید. واحد کنترل فازی دور کودآبیاری شامل حسگرهای دما و رطوبت نسبی بوده که به کمک تشخیص وضعیت روشن و خاموش بودن لامپ، مقدار تبخیر و تعرق گیاه را توسط مدل فازی توسعه داده شده برآورد می‌کرد. پس از طراحی و اعمال اصلاحات لازم، دو کشت معتبر توسط دستگاه صورت گرفت. کشت اول بدون استفاده از سامانه هوشمند آبیاری (کشت On/Off) و کشت دوم با منظور نمودن این سامانه (کشت فازی) که هر دو کشت در فصل زمستان انجام پذیرفت. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد سامانه در این دو کشت در موارد زیر خلاصه می‌شود:

ارزیابی مصرف آب در دو کشت صورت گرفته نشان داد که در کشت فازی نسبت به On/Off مصرف آب حدود ۲۴٪ کاهش یافت.

دو کشت فازی و On/Off مطابق انتظار تفاوت چندانی در مصرف انرژی کلی با یکدیگر نداشتند. اما در کشت On/Off سهم انرژی خورشیدی و برق شهر به‌ترتیب ۷۱/۳۲ کیلووات ساعت (۴۸/۴۱٪) و ۷۶ کیلووات ساعت (۵۱/۵۹٪) بود، در حالی که در کشت فازی به سبب بهبود شرایط تابش این مقادیر به ۸۶/۸۱ کیلووات ساعت (۵۸/۸۱٪) و ۶۰/۸۰ کیلووات ساعت (۴۱/۱۹٪) رسید.

نتایج حاصل از بررسی عملکرد کاهوی کاشته شده در دو کشت فازی و On/Off نشان داد که الف) کشت کاهو با استفاده از حداکثر ظرفیت دستگاه یعنی ۸۰ گیاه منجر به تراکم ۶۶ گیاه در هر مترمربع گردید که در قیاس با کشت مزرعه‌ای کاهو افزایش متوسط ۱۲ برابری و در قیاس با کشت گلخانه‌ای افزایش متوسط ۴ برابری تراکم کشت را به دنبال داشت. ب) استفاده از روش آبیاری مبتنی بر نیاز گیاه باعث افزایش عملکرد وزنی محصول شد. به‌طوری‌که مجموع محصول قابل مصرف تولیدی کاهو در روش فازی ۷۴/۴۷٪ نسبت به روش On/Off افزایش داشت. نتایج حاصل از مقایسه شاخص‌های رشدی گیاه در دو کشت فازی و On/Off نشان داد که تمامی این شاخص‌ها در کشت فازی به شکل معنی‌داری (P<۰/۰۵) از کشت On/Off بهتر است.

در مجموع، نتایج نشان داد که اولاً توسعه روش‌های کشت فشرده می‌تواند در تولید پایدار محصولات کشاورزی و امنیت غذایی نقش مهمی ایفا کند. همچنین، استفاده از انرژی خورشیدی برای انجام عملیات کشاورزی در صرفه‌جویی منابع انرژی فسیلی بسیار حائز اهمیت است. در نهایت، آبیاری هدفمند و مبتنی بر نیاز گیاه که کاهش قابل ملاحظه مصرف آب را به‌همراه دارد نه تنها باعث افت کیفیت محصول تولیدی نمی‌شود بلکه بهبود فراوان این شاخص‌ها را موجب می‌گردد. لذا این راهبرد را می‌توان در سایر روش‌های کشت مزرعه‌ای و گلخانه‌ای نیز استفاده نمود. به سبب عدم نیاز این دستگاه به خاک، نیاز کم آن به آب و انرژی و استفاده از منبع فراوان انرژی خورشیدی می‌توان آن را در هر شرایط اقلیمی، حتی در مناطقی که دسترسی محدودی به منابع آب و نیز شبکهٔ برق وجود دارد ترویج نمود. همچنین، می‌توان این دستگاه را در شکلی ساده و کوچک به خانواده‌های شهری توصیه نمود تا آن‌ها با تولید سبزیجات سالم بخشی از نیازها در این زمینه را حتی در آپارتمان خود تأمین کنند و از این جهت اهدافی مثل دسترسی به غذای سالم، کاهش تردد در شهر و کاهش آلودگی هوا و نیز کم شدن نقش واسطه ها محقق گردد.

سپاسگزاری

این طرح با پشتیبانی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور طی قرارداد شماره ۹۳۰۱۱۲۶۹ اجرا شده‌است که بدین‌وسیله از این نهاد تشکر و قدردانی می‌شود.

References

1. Aghkhani, M. H., M. H. Abasspour-Fard, M. R. Bayati, H. Mortezapour, S. I. Saedi, and A. Moghimi. 2013. Performance analysis of a solar dryer equipped with a recycling air system and desiccant chamber. Journal of Agricultural Machinery 3 (2): 92-103. (In Farsi).
2. Alavian, S., M. Jahanshahi, and M. Tamanalu. 2012. Design of sugeno and mamdani fuzzy inference system for the estimation of daily reference evapotranspiration. Congress of electrical computer and information technology engineering. Mashhad, Iran. (In Farsi).
3. Alizadeh, A. 2011. Soil, Water and Plant Relationship. Emam Reza University Press. (In Farsi).
4. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome 300: D05109.
5. Anonymous. 2015. Iran 1393 agricultural statistics. Ministry of Agriculture – Jahad. (In Farsi).
6. Chang, C. L., and K. P. Chang. 2014. The growth response of leaf lettuce at different stages to multiple

wavelength-band light-emitting diode lighting. Scientia Horticulturae 179: 78-84.
7. Cobaner, M. 2011. Evapotranspiration estimation by two different neuro-fuzzy inference systems. Journal of Hydrology 398: 292-302.
8. Ed-Dahhak, A., M. Guerbaoui, Y. ElAfou, M. Outanoute, A. Lachhab, L. Belkoura, and B. Bouchikhi. 2013. Implementation of fuzzy controller to reduce water irrigation in greenhouse using LabView. International Journal of Engineering and Advanced Technology Studies 1: 12-22.
9. Entesari, M., N. Heidari, J. Kheirabi, M. Alaei, A. Farshchi, and J. Vaziri. 2007. Water use efficiency in greenhouse production. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage (IRNCID). (In Farsi).
10. Hashemi Najafi, F., J. A. Palangi, and R. Azbarmi. 2007. Estimation of reference evapotranspiration (ETo) using neuro-fuzzy networks (ANFIS). 9th National conference on irrigation and evaporation reduction. Kerman, Iran. (In Farsi).
11. Hassandokht, M. 2012. Greenhouse management (technology of greenhouse crops production). Selseleh pub. (In Farsi).
12. Hassandokht, M. 2012. Vegetables Production Technology. Selseleh pub. (In Farsi).
13. Kia, P. J., A. T. Far, M. Omid, R. Alimardani, and L. Naderloo. 2009. Intelligent control based fuzzy logic for automation of greenhouse irrigation system and evaluation in relation to conventional systems. World Applied Sciences Journal 1: 16-23.
14. Kişi, Ö. 2013. Applicability of Mamdani and Sugeno Fuzzy Genetic Approaches for Modeling Reference Evapotranspiration. Journal of Hydrology 504 160-170.
15. Kişi, Ö., and Ö. Öztürk. 2007. Adaptive neurofuzzy computing technique for evapotranspiration estimation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 133: 368-379.
16. Marchildon, T. 2003. Rotary Plant Apparatus. United States of America.
17. Martha-Rocio, C., G. Juan-Luis, P. Oscar-Antonio, H. Mónica-Karel, D. Rivas, and M. Erazo. 2015. Fuzzy system of irrigation applied to the growth of Habanero pepper (Capsicum chinense Jacq.) under protected conditions in Yucatan, Mexico. International Journal of Distributed Sensor Networks.
18. Masterss, G. M. 2004. Renewable and Efficient Electric Power Systems. John Wiley & Sons, Inc., publication.
19. Mazari-Menghabi, H. 2014. Quantification of physical properties of combined substrates using components properties and comparison of some greenhouse tomato transplant substrates. MS thesis. Tehran University.
20. Mirzaee, E., M. Omid, A. Keyhani, and P. Javadikia. 2013. Forecasting the Thermal Load for Implementing Solar Energy in a Model Poultry House. Journal of Agricultural Engineering and Biotechnology 1: 30-36.
21. Moradi, H., H. Ansari, A. Alizadeh, S. Hasheminia, and M. Naderianfar. 2012. Modeling gross evapotranspiration under non-standard using fuzzy inference system Journal of water and soil (agricultural science and technology) 26: 507-494. (In Farsi).
22. Morewane, M. B. 2014. Effects of LED spectrum combinations on the absorption of mineral elements of hydroponic lettuce. Spectroscopy and Spectral Analysis 34: 1394-1397.
23. Mousazadeh, H., and S. Javanbakht. 2010. Photovoltaic. Iran agricultural science. (In Farsi).
24. Mousazadeh, H., A. Keyhani, A. Javadi, H. Mobli, K. Abrinia, and A. Sharifi. 2010. Optimal power and energy modeling and range evaluation of a solar assist plug-in hybrid electric tractor (SAPHT). Transactions of the ASABE 53: 1025-1035.
25. Peivast, G. 2009. Growing Vegetables. Danesh Pazir Publication.
26. Roustaee, A. 2009. Les cultures vegetables hors sol. Iranian Student Book Agency. (In Farsi).
27. Salih, J. M., and A. Adom, and A. M. Shaakaf. 2012. Solar Powered automated fertigation control system for cucumis melo L. cultivation in green house. APCBEE procedia 4: 79-87.
28. Shayannejad, M., and S. Saadati Nejad. 2007. Determining of evapotranspiration by using Fuzzy regression method. Journal of water resources researche 9: 1-9. (In Farsi).
29. Shimokawa, A., Y. Tonooka, M. Matsumoto, H. Ara, H. Suzuki, N. Yamauchi, and M. Shigyo. 2014. Effect of alternating red and blue light irradiation generated by light emitting diodes on the growth of leaf lettuce. bioRxiv: 003103.
30. Shiri, J., A. H. Nazemi, A. A. Sadraddini, G. Landeras, O. Kisi, A. F. Fard, and P. Marti. 2013. Global cross-station assessment of neuro-fuzzy models for estimating daily reference evapotranspiration. Journal of hydrology 480: 46-57.

31. Teshneh Lab, M., N. Saffar Pour and D. Afyoni. 2013. A Course in Fuzzy Systems and Control. Tehran, Khajeh Nasir University of Technology. (In Farsi).
32. Wen, J., Q. Yang, L. Wei, R. Cheng, W. Liu, S. Bao, and W. Zhou. 2011. Influence of combined lighting with different red and blue LED on photosynthetic characteristics and quality of lettuce and evaluation of energy consumption. Acta Horticulturae Sinica 38: 761-769.
33. Yanagi, T., K. Okamoto, and S. Takita. 1996. Effects of blue, red, and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants. Pages 117-122. International Symposium on Plant Production in Closed Ecosystems 440.
34. Yano, A., M. Onoe, and J. Nakata. 2014. Prototype semi-transparent photovoltaic modules for greenhouse roof applications. Biosystems Engineering 122: 62-73.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 8, No. 2, Fall - Winter 2018, p. 279-294

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۸، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۷، ص ۲۹۴-۲۷۹

Design and Development of a Solar Hydroponic Rotary Cropping Apparatus with an Intelligent Irrigation System

S. I. Saedi[1]- R. Alimardani[2*]- H. Mousazadeh[3]- R. Salehi[4]

Received: 08-01-2017
Accepted: 08-08-2017

Introduction

Global increase in the food demand and challenges regarding the water, energy and fertile soil has made it clear that current strategies are no longer efficient for maintaining food safety. Therefore, attention to novel, science-based, seasonal and climate-independent farming methods which could result in the higher crop quality and quantity is an inescapable decision. Among all agricultural practices and technologies, intensive culture and hydroponic methods in controlled environments play an important role.

Materials and Methods

To address these challenges, an indoor solar-powered auto-irrigate rotary cropping system (SARCS) was designed and implemented. Arrangement of plants in the surface area of an open-ended drum makes it possible to use space rather than area to maximize the acreage. An embedded fuzzy control system managed the irrigation process based on the plant water requirement predictions, and photovoltaic panels (PVs) was responsible for system electrical energy provision. The drum rotates around its horizontal axis where LED lamps are positioned to provide light to plants. This structure causes the plants gain the light illumination efficiently while getting access to water accumulated in the secondary tank positioned beneath the drum. Fertigation fuzzy control was based on plant evapotranspiration (ET) estimations with temperature, humidity, and light as its inputs. The instantaneous estimated ETs which were measures for root substrate moisture were summed until reaching its critical value which is equivalent to plant readily available water (RAW). This tends to trigger a pump submerged in a primary tank to fill the secondary one up to a predefined height ruled by a level sensor. The solar energy system consisted of PVs, MPPT, inverter, and battery bank. The SARCS evaluation procedure included two valid lettuce cultivation in grow bags filled with the same proportions of perlite and coco peat as a root substrate. The first cultivation used water level sensors to rule the irrigation process (non-fuzzy) while the second one (fuzzy) were governed by fertigation cycle fuzzy control.

Results and discussion

The results showed that employing these two modes increased lettuce planting density to about 12 times in the field culture and 4 times in the greenhouse. The energy consumption evaluation revealed that in fuzzy and non-fuzzy approaches the same amounts of energy were needed. But in fuzzy mode the amount of energy consumed per kilogram of marketable lettuce was 74.33% less than in non-fuzzy mode. Fuzzy and non-fuzzy modes utilized 58.81% and 48.41% of the total energy requirements from PVs, respectively. It was calculated that the solar system is able to supply 51.16 % of SARCS total annual energy requirements in Karaj Province. The results of water consumption evaluations revealed that the fuzzy approach could cut the needed water to 24%, and improved the marketable product to 74.47%. For producing one kilogram dry and fresh biomass, fuzzy mode used 50.41% and 55.53% less water than non-fuzzy, respectively. Furthermore, one kilogram marketable product in fuzzy approach needed 56.46% less water than in non-fuzzy. The averaged water needed for growing

1- Assistant Professor, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
2- Professor, Department of Agricultural Machinery, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
3- Associate Professor, Department of Agricultural Machinery, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
4- Assistant Professor, Department of Horticultural Sciences, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
(*- Corresponding Author Email: rmardani@ut.ac.ir)

one lettuce plant in non-fuzzy and fuzzy modes were 15 times less than in field lettuce. The comparison of growth parameters of harvested lettuce in the two studied approaches revealed that fuzzy mode would have significantly ($P<0.05$) higher results in all parameters.

Conclusions

The results suggested that the development of intensive culture strategies would play an important role in the sustainable agricultural production and food safety. Also, the solar energy utilization in farming practices could save fossil resources and decrease air pollutions. Finally, purposeful irrigation approaches which are based on plant water requirement predictions can significantly reduce the total water consumption and improve products quality. This strategy, therefore can be introduced to other farming practices such as field and greenhouse methods.

Keywords: Fuzzy logic, Hydroponic, Intelligent irrigation, Rotary cropping, Solar energy